

核燃料燃焼解析手法の開発と照射後試験結果解析による検証

著者	須山 賢也
号	1734
発行年	1994
URL	http://hdl.handle.net/10097/7007

氏 名	須 山 賢 也
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	核燃料燃焼解析手法の開発と照射後試験結果解析 による検証
指 導 教 官	東北大学教授 平川 直弘
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 井上 泰 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 戸田 三朗

論 文 内 容 要 旨

使用済み核燃料の組成を正確に計算する事は、原子力開発のバックエンドにおいて重要であり、使用済み燃料を取り扱う施設において臨界安全性を確保する際に、燃焼燃料の反応度の低下について考慮する「Burnup Credit」の考え方を導入する上で、非常に重要である。そのために、これまでも多くの計算コードが開発されてきた。しかしながら、現在使用されている最新の燃焼計算コードですら、計算精度は Burnup Credit の計算にとって不十分である。さらに、計算コードが広く利用されるためには、これまでのように大型計算機にのみ依存をした開発を行う事は、移植性が低下するという問題があり、現在広く利用されている Engineering Work Station (EWS) など多くの計算機上で動くことが必要であると考えられる。本論文では、現在求められている、Burnup Credit を初めとした原子力のバックエンドにおいて重要な同位体の生成消滅計算を精度良く行う事が可能な計算コードシステムの開発と検証を行う。

初めに、開発を行う燃焼計算コードに求められる性質を調べた。まず、Burnup Credit で重要な同位体について予備解析を行う。そのため、同位体の有する反応度効果を、SRAC による無限円筒体系での中性子増倍率計算によって調べた。その結果、 ^{235}U 、 $^{239,240,241}\text{Pu}$ そして、核分裂生成物 (FP) が重要である事を確認した。また、バックエンドの観点からは、マイナーアクチノイド (MA) の半分を占める ^{237}Np や、それとは反対に生成量が少い ^{236}Pu の同位体量の計算精度の向上も重要である。ここに示した FP や MA は、複雑な生成経路を通じて生成されるために、周辺の多

くの同位体を含めた生成消滅計算が可能であることが、計算コードが有すべき性質の一つである。次に、燃焼計算の精度向上には、使用する核データの精度の向上が重要である事に着目した。そこで、計算に使用する核データの問題を検討した。近年公開された核データライブラリーには多くの同位体のデータが内蔵されており、それらのデータを燃焼計算に利用する事が求められるが、今後さらに評価の精度が向上すれば、さらに精度の良い核データを利用可能になる。よって、最新の核データを容易に利用可能な計算コードである事が必要である。また、中性子スペクトルは燃焼中に変化をし、原子炉の型式によっても異なるが、それは、燃焼計算で使用する断面積の縮約に使用されるために、解析する原子炉や燃焼パターンに対して、それぞれ評価を行う事が出来る計算コードである事が求められる。以上に示した計算コードが有すべき性質を実現するために、燃焼計算コードシステムの基礎としてステップワイズ燃焼計算手法を導入した。

この計算手法は、燃焼履歴を分割し、その時点での中性子スペクトルを評価して、燃焼計算に使用する断面積を計算して、燃焼計算を行う手法である。それに基づいた計算コードシステム SWAT を開発した。Figure 1 に SWAT における計算の流れを示す。この計算コードは、中性子スペクトルを計算する SRAC と燃焼計算を行う ORIGEN 2 という計算コードを内包した計算コードシステムであって、複雑な入力データ作成の作業を極力少なくしたシステムである。このコードの開発にあたっては、移植性と計算費用の低減を考慮に入れて EWS を開発のプラットフォームとした。SWAT においては、最新の核データの成果を利用するために、最新の核データである JENDL-3 および ENDF/B-VI に基づいて、アクチノイドの中性子捕獲、 $(n, 2n)$ 、及び核分裂反応断面積の 107 群断面積ライブラリを作成した。一方、FP については、中性子捕獲および $(n, 2n)$ 反応断面積の 107 群断面積ライブラリを作成した。特に FP については、核分裂収率および崩壊定数についても最新のデータを使用するために、JNDC Nuclear Data Library of Fission Products-second version-のデータを ORIGEN 2 フォーマットのライブラリに編集した。この FP ライブラリは既存の ORIGEN 2 に何の変更もなく利用することが可能なライブラリであり、これにより、最新の ORIGEN 2 用の FP ライブラリを提供する事が出来た。SWAT は、これらのライブラリを体系に依存した中性子スペクトルで縮約して燃焼計算を行うことで、核データに対する照射後試験結果による補正をまったく必要としない計算コードシステムである。そして、SWAT 内蔵のライブラリ間の計算値の比較を行い、新しいライブラリを用いる事による計算値の改善およびその変化を調べた。その結果、主な MA については、ライブラリ間で計算値は大きな違いを示さないが、 ^{236}Pu 、 ^{237}Np 、 $^{245,246,247}\text{Cm}$ に

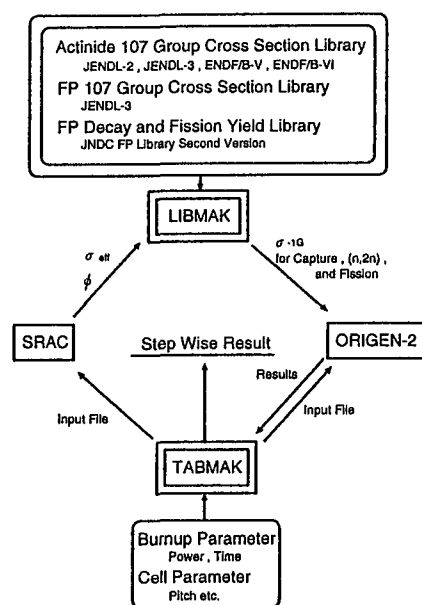


Figure 1 : Flow Chart of SWAT

については、ライブラリ間の差が大きい事を示した。これらの結果は、最新のデータを使用して解析を行う事の重要性を示すものである。

次に、基本的なコードの特性を見るため、既存のコードとの比較を行った。そこで、入力データの違いを無くした比較を行うため、NEA で提出された国際 Benchmark 計算に参加して、多くの研究機関で行われた結果と比較した。それにより、SWAT による計算の妥当性を確認した。さらに、本コードシステムによって照射後試験(PIE)の結果の解析を行った。初めに、Trino Vercellece 炉において行われた PIE を解析した。その結果、現在広く利用されている燃焼計算コードである ORIGEN 2 に比較して、計算値が改善されている事を示した。さらに、詳細な運転履歴が分っている、美浜原子力発電所 3 号機において行われた PIE の解析を行った。解析においては、体系内の非均質性を考慮した解析を行った。

そして、この PIE の解析結果について、考察を行った。まず、Pu-239 の計算値が実験値と異なっていることに注目した。すなわち、高次アクチノイド同位体の生成が燃料の外部において起っている事に注目して、燃料ペレットを分割した解析を行った。その結果、高燃焼度サンプルでは、着目していた核である ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{244}Cm について、既存のコードよりも良好な結果が得られることを明らかにした。この計算結果から、反応度の予測精度を評価した。計算は、SWAT の計算によって得られた組成と、実験によって得られた組成を使用して、SRAC によって中性子増倍率の計算を行い、両者の計算された中性子増倍率の差を調べた。また、既存の燃焼計算コードシステムとの比較は、近年、日本原子力研究所において開発された SRAC-FPGS との比較で行った。

その結果を Figure 2 に示す。この図からわかるように、SWAT による計算で得られた燃料組成を用いて中性子増倍率を評価した場合には、SRAC-FPGS による計算で得られた組成を用いて中性子増倍率を計算した場合に高燃焼度において見られていた、中性子増倍率予測精度の悪化が改善されており、最大で 1.4% の差になっていることを示した。この Figure 2 から分るが、中燃焼度においては高燃焼度サンプルより計算値が悪い結果となった。これについては、体系の中性子スペクトルを硬くさせると、高燃焼度サンプルと同様の結果を得る事が可能であることを確認した。この事から中燃焼度サンプルの不一致の原因は、中性子スペクトルの評価方法にあることを示した。さらに、既存のコードと比較して計算値が改善されたとは言え、高次アクチノイドについては実験値

と計算値の差が 20% 近くあるので、その原因が反応断面積にあると考えて感度解析を行う。そして、 ^{235}U から ^{244}Cm までの同位体についての感度係数を得た。その結果、 $(n, 2n)$ 反応は多くの同位体に対して感度を持っていない反面、 $^{239,240,241,242}\text{Pu}$ 等のプルトニウム同位体の中性子捕獲反応

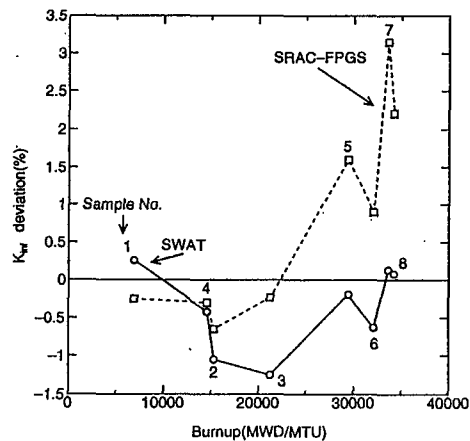


Figure 2 : Deviation of K-infinity

は、高次の同位体の計算結果に大きな効果を有しており、Am の中性子捕獲断面積も同様に Cm 同位体の計算結果に大きな感度を有していることが分った。さらに、Am や Cm の断面積は、U そして Pu 同位体の計算値には大きな感度を有しておらず、それらの断面積の効果について、U や Pu とは独立に考える事が可能であることも分った。これらのデータを基にして、断面積調整により、実際に高次アクチノイドの計算値を向上させるような模擬が可能であることを示した。

最後に、燃料の高燃焼度化のために、現在導入が進められている、Gd 入り燃料について解析を行った。Gd 入り燃料のような非均質性の強い体系の解析には、モンテカルロ法のような、正確に体系を模擬出来る計算コードの使用が必要であると考えられるが、本論文では、SRAC で計算が可能な体系によって、どの程度実験値との一致が得られるかを調べる。その結果、Gd 入り燃料の解析では、近似が粗いことを考えると、良好な結果を得た。一方、Gd 入り燃料に隣接した通常燃料の解析では、スーパーセルのままで計算を行う事によって、比較的良好な結果を得る事を確認した。この Gd 入り燃料の解析においては、これまで解析対象とならなかった ^{236}Pu や $^{245,246,247}\text{Cm}$ についての結果が与えられているため、これらについても比較をした。その結果、JENDL-3 のライブラリを使用しても、 ^{236}Pu は 50% 以上の過小評価となる事がわかった。また、 $^{245,246,247}\text{Cm}$ についても、 ^{244}Cm の 30% 近い過小評価に起因して、高次同位体になるにつれて過小評価の傾向が強まり、 ^{246}Cm は、最新のライブラリを使った場合でも 50% もの過小評価になることがわかった。

これら一連の開発と検証によって、Burnup Credit や原子力開発のバックエンドにおいて重要な同位体の計算値について、従来のコードに比較して精度の向上を計った、燃焼計算コードシステムの開発を達成した。

審 査 結 果 の 要 旨

原子炉から取り出される使用済み核燃料の核種組成を正確に予測することは、使用済み核燃料の輸送、貯蔵、再処理およびアクチニド元素の消滅処理等において重要であるが、この予測のための従来の計算コードは、汎用性に欠け、あるいはその使用が大型計算機に限られる、使用している核データライブラリーの根拠が明確でない等の問題があった。本論文は使用済み核燃料の核種組成の計算精度の向上を目指して、新たな燃焼計算コードシステムを開発し、かつ最新の核燃料照射後試験結果（以下PIE）によってその検証を行なった成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章ではまず燃焼計算における核データの重要性を指摘し、次いで最新の核データライブラリーを使用可能とするステップワイズ燃焼計算手法と、それに基づいて最近の中小型計算機を使用することを前提として開発した燃焼計算コードシステム（SWAT）について説明している。そして最新の核データライブラリーを用いることにより多くの核種の計算精度が向上することを述べている。

第3章では欧州原子力機関が1992年に提出した国際ベンチマーク計算に参加し、SWATの計算結果を他機関の結果と比較することにより、本システムの計算が妥当であることを示している。

第4章ではまずイタリア Trino 炉における PIE の結果を SWAT により解析し、従来の計算コードによるものに比し大幅な改善ができたことを示している。ついで我が国の美浜原子力発電所3号機の PIE を解析し、共鳴核種に対して超詳細群による取扱いが必要なことを示しているが、これは重要な成果である。なお、これに基づいた解析結果はU同位体に対しては良い結果を与えるが、Pu 同位体および高次アクチニド核種に対してはなお計算値が過小評価となる傾向であることを述べている。

第5章では第4章で示された不一致の原因を考察している。まず計算時の燃料ペレットの分割について検討し、ペレットを2分割することにより、中燃焼度の試料を除き Pu 同位体の計算結果に著しい改善が図られることを示している。ついで中燃焼度の試料について検討し、照射中の中性子スペクトルが原子炉の代表的スペクトルより硬ければ計算結果が改善されることを述べている。さらにアクチニド同位体の生成量に対する断面積の感度評価を行ない、 $^{240,241,242}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am の捕獲断面積を調整することにより、計算値の改善を図り得ることを示している。

第6章では燃料の高燃焼度化の目的で使用されている Gd 入り燃料の PIE の解析を行なっている。そして計算手法の限界から行なった粗い近似のことを考えると良好な結果が得られること、および Gd 入り燃料に隣接する燃料については本解析の手法で良好な結果を得たことを述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、最新の核データライブラリーを使用できる汎用性の高い原子炉核燃料燃焼計算コードシステムを新たに開発し、その精度を燃料の照射後試験結果と比較することにより検証し、その適用範囲を明らかにしたもので、原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。